

Circuitos integrados fotónicos para la generación de frecuencias ópticas (OFCG)

F. Vinicio Corral^a, Guillermo Carpintero^b

^aDepartamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

^bDepartamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid.

fvcorral@espe.edu.ec, guiller@ing.uc3m.es

Resumen—Se presentan los avances realizados en el desarrollo de generadores de peines de frecuencias ópticas (OFCG *Frequency Comb Generator*) mediante circuitos integrados fotónicos (PIC, *Photonic Integrated Circuits*). Estos son diseñados y fabricados en un proceso de construcción común en plataformas genéricas de integración. Se muestran los resultados experimentales de las diferentes clases de OFCG destacándose los grandes anchos de banda logrados, en el orden de THz. Se resalta la factibilidad de disponer circuitos fotónicos miniaturizados en sistemas de banda ancha y otras aplicaciones futuras en el marco de la nanotecnología.

Palabras Claves—Circuitos integrados fotónicos, diodo láser, fibras ópticas, fotónica, peine de frecuencias ópticas.

Abstract—We present the progress made in the development of optical frequency combs generators (OFCG) using Photonic Integrated Circuits (PIC). These are designed and manufactured in a common building process in generic integration platforms. The experimental results of the different OFCG classes are shown, highlighting the large bandwidths achieved, in the order of THz. The feasibility of providing miniaturized photonic circuits in broadband systems and other future applications in the framework of nanotechnology is highlighted.

Keywords—Laser diode, Optical fiber, Optical frequency comb, Photonic integrated circuits, Photonics.

I. INTRODUCCIÓN

Los generadores de frecuencias ópticas (OFCG, *Optical Frequency Comb Generator*) tienen varios campos de aplicación. Por ejemplo, son utilizados en comunicaciones ópticas como fuentes para transmisores en sistemas de multiplexación densa por división de longitud de onda (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) que explotan el gran ancho de banda de las fibras ópticas monomodo [1], [2]. WDM es una técnica de transporte que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, incrementando la capacidad de los enlaces. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha definido el estándar G.692 para DWDM en el que establece unas longitudes de onda utilizables (“rejilla ITU”), en la banda de 1550 nm [3]. Dicha rejilla se especifica en frecuencia con espaciados de 100 GHz y de 50 GHz.

Un solo peine de frecuencias, potencialmente reemplaza a múltiples fuentes individuales de láseres, optimizando los sistemas. Las técnicas más utilizadas para conseguir OFCG son: a) Moduladores en cascada [4], [5], b) Moduladores en anillo recirculante [6] y c) Láseres mode-locked [7].

Nuestra investigación se ha enfocado en el desarrollo de OFCG basados en circuitos integrados fotónicos (PIC, *Photonic Integrated Circuits*), por sus múltiples ventajas

como menor tamaño, mayor simplicidad en el ensamblaje, menor consumo de potencia y mejor rendimiento porque se integran elementos activos y pasivos en el mismo chip. Además, se pueden utilizar plataformas genéricas de integración, en las que diferentes PICs con un amplio rango de funcionalidades pueden ser construidos a partir de bloques estandarizados básicos, tales como amplificadores, moduladores, fotodiodos, guías de onda, acopladores, filtros y multiplexores. Los bloques estándares son provistos por las plataformas genéricas y utilizando software de diseño y simulación, se pueden crear nuevos circuitos. Los PICs provenientes de diferentes diseñadores, usando la misma plataforma pueden compartir el proceso de fabricación común en una ronda denominada MPW (*Multi-Project Wafer*), con calidad confiable y reducción de costos [8]. Hay varios grupos de investigación trabajando en PICs [9]-[12].

En nuestro trabajo, se han caracterizado varias estructuras que implementan un OFCG fabricadas en PICs. Primero operamos con moduladores en anillo recirculante, con diferentes estructuras: a) OFCG con moduladores de fase y láser semilla externo; b) OFCG con moduladores de fase y láser semilla interno y c) OFCG con modulador de fase, modulador de intensidad (MZM, *Mach Zehnder Modulator*) y láser semilla interno. Después desarrollamos un OFCG basado en un láser anillo mode locked pasivo monolíticamente integrado [13], cuyo diseño permite generar frecuencias espaciadas 10 GHz y que al no requerir fuente láser semilla, es más ventajoso que el OFCG con moduladores en anillo recirculante.

El presente artículo tiene como objetivo describir los diseños de PICs realizados y presentar los resultados de las mediciones. Su estructura es la siguiente: en la sección II se describen los dispositivos OFCG diseñados y fabricados. En la sección III se presentan y analizan las mediciones de espectro óptico obtenidos. Finalmente, las conclusiones más relevantes son expuestas en la sección IV.

II. DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Un OFCG es una fuente óptica que genera un gran número de longitudes de onda, equiespaciadas en frecuencia y de igual amplitud, todas ellas enganchadas en fase.

A. OFCG Basado en un Anillo Recirculante utilizando Moduladores de Fase.

Presentamos el diseño de un PIC que implementa el OFCG basado en un anillo recirculante utilizando moduladores de fase electro-ópticos (EOPM, *Electro-Optic Phase Modulator*) [6]. El diseño se basa en los bloques estándares de la plataforma de integración de OCLARO Tech. [14]. El peine óptico produce múltiples longitudes de

onda, equiespaciadas por la frecuencia RF proporcionada por un sintetizador externo, a partir de una longitud de onda (λ semilla). Esta λ semilla se puede introducir externamente o por fuente interna (on-chip), por medio de un láser monomodo para desarrollar un OFCG totalmente integrado. La ventaja es que tiene pequeñas dimensiones (6 x 2 mm), cuyos elementos se interconectan con guías de onda de InP que reemplaza a la fibra óptica, evitando variaciones térmicas que afecten la señal generada. La fotografía del PIC diseñado y fabricado se muestra en la Fig. 1.

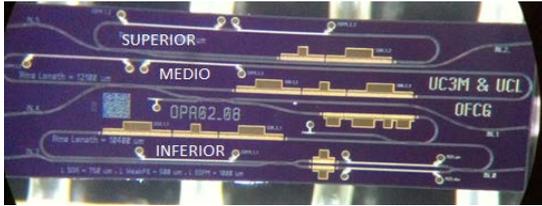


Fig. 1. Fotografía del PIC, generador de peine de frecuencias ópticas, mostrando los tres anillos: superior, medio e inferior

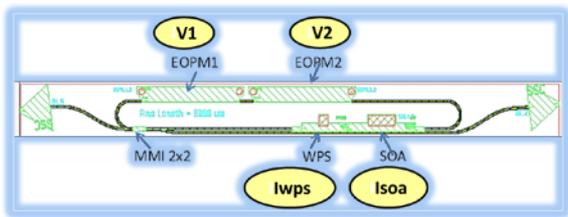


Fig. 2. Estructura del anillo OFCG con láser semilla externo, con dos EOPMs, un SOA, un WPS y un acoplador MMI.- V1, V2: polarización inversa.- Iwps, Isoa: corriente en el WPS y SOA.

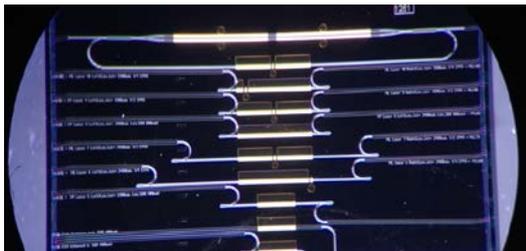


Fig. 3. Fotografía del Circuito integrado fotónico que contiene el láser mode-locked pasivo anillo y otros láseres.

El chip diseñado incluye tres estructuras en anillo, con diferente longitud de cavidad, para experimentar con diversas frecuencias. Nos referimos a estos anillos como SUPERIOR (longitud 8000 μm , frecuencia de repetición, $f_{RP} = 10$ GHz), MEDIO (longitud 12100 μm , $f_{RP} = 6.7$ GHz) e INFERIOR (longitud 10400 μm , $f_{RP} = 7.5$ GHz). Nos enfocaremos en el primer anillo para lograr un OFCG con moduladores de fase y láser semilla externo (10 GHz). Este anillo superior dispone de los siguientes bloques estándares:

- Dos moduladores EOPM, de 1000 μm de longitud; este valor es recomendado para lograr una eficiente modulación a altas frecuencias (~ 10 GHz) y bajos voltajes de polarización (< 5 voltios) [15]. Se usan dos moduladores para conseguir un mayor ancho de banda del peine óptico [16].
- Un amplificador óptico (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*) de 750 μm de longitud, establecida mediante curvas de ganancia modal versus longitud de onda y densidad de corriente de inyección.
- Una guía de onda pasiva con control de fase (WPS,

Weak waveguide with Phase control), de 500 μm de longitud, que permite el cambio del índice de refracción, a través de la inyección de corriente. El WPS se encarga de la sintonización fina de la fase de la señal que se genere.

La longitud total de la cavidad es 8062 μm , que se calcula para conseguir un espaciamiento de 10 GHz. El esquema se muestra en la Fig. 2, con dos accesos que permiten inyectar el láser externo y observar la potencia óptica de salida.

B. OFCG Basado en un Láser Anillo Mode Locked Pasivo.

Los láseres mode locked (MLLD) tienen en la cavidad dos secciones: el medio activo semiconductor (SOA) para generar luz, y el absorbente saturable (SA), que permite enganchar los modos ópticos en fase. Existen dos regímenes de operación. Cuando en el SA se introduce una polarización inversa, con una fuente de tensión (DC), el dispositivo opera en régimen Mode-Locking pasivo (PML). Si a la señal continua se le añade una señal de referencia eléctrica, cuya frecuencia es la misma que la del armónico fundamental, el dispositivo opera en régimen Mode-Locking Híbrido (HML).

Nosotros realizamos el diseño mediante láser PML monolíticamente integrado en configuración anillo. El láser contiene dos SOA de 370 μm con un SA en el medio de 20 μm y un acoplador de interferencia multimodo (MMI, *Multimode Interference Coupler*) que acopla las dos ondas ópticas generadas en el anillo [17]. La regla de diseño establece que la relación de la longitud entre el SOA y el SA debe ser de 10 a 20 veces, para conseguir un mode locked estable [18]. En nuestro caso, la relación entre SOA y SA es 18.5. También dispone de un Interferómetro Mach Zehnder que usa dos EOPM de 1000 μm en cada brazo para equalizar el espectro de ganancia en la cavidad láser [19]. El PIC fue fabricado en la plataforma de Cobra/SMART Photonics [20]; su fotografía y diagrama se muestran en las Fig. 3 y Fig. 4.

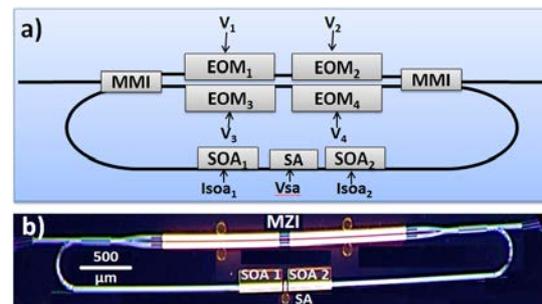


Fig. 4. (a) Diagrama del láser anillo. SOA: Semiconductor optical amplifier, SA: Saturable absorber, MMI: Multimode interference, EOM: electro-optic modulator. (b) Fotografía del láser indicando el Mach Zehnder Interferometer (MZI) y los EOM.

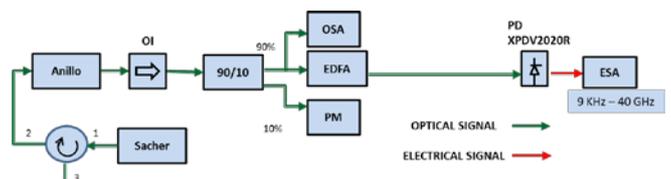


Fig. 5. Setup para mediciones en estructura anillo con láser externo. OI: Aislador Óptico. OSA: Analizador de Espectros Óptico. EDFA: Amplificador de fibra dopada de erbio. PM: medidor de potencia. PD: fotodiodo modelo XPDV2020R. ESA: Analizador de Espectros Eléctrico

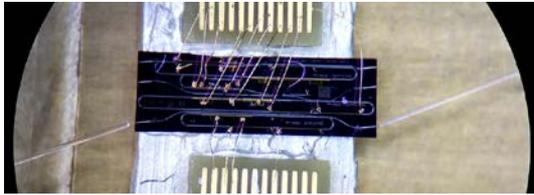


Fig. 6. Estructura de anillo con dos EOPMs, un SOA y un WPS, en el interior del PIC, con dos fibras ópticas de acceso.

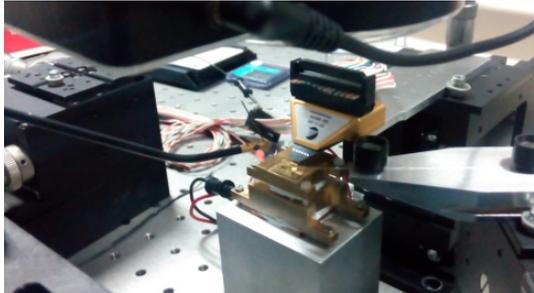


Fig. 7. Fotografía del montaje del PIC.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Presentamos los resultados de espectro óptico emitidos por cada uno de los OFCG diseñados y fabricados.

A. OFCG en Anillo Recirculante con Moduladores de Fase.

Para las mediciones utilizamos el setup indicado en la Fig. 5. Una fibra con lente y un aislador óptico (OI, *Optical isolator*) sirven para acoplar la luz de salida de la guía de onda. Este se conecta con un divisor de potencia 90/10. La salida del 10% se une al Medidor de Potencia (PM) que mide la potencia óptica generada. El otro brazo, con 90% de división, se conecta a los instrumentos de medida. Se utiliza un láser sintonizable, marca Sacher Technique, con potencia de emisión de hasta 200 mW. La luz emitida por este láser ingresa al anillo del PIC, a través de un circulador, que evita reflexiones. El anillo tiene dos accesos para inyectar el láser externo y observar la potencia óptica de salida, según la fotografía que mostramos en la Fig. 6. Las corrientes y tensiones se inyectan a través de la punta multi-contacto (Microtech EP-12-250), cuyo montaje se visualiza en la Fig. 7.

Para extraer el espectro óptico inyectamos la señal del láser externo con los valores: potencia de salida= 1 dBm, y $\lambda = 1541.6$ nm. Los moduladores EOPM fueron polarizados en forma inversa con voltajes $V_1 = V_2 = -2.5$ V y la corriente del SOA a 80 mA. Obtuvimos el espectro óptico mostrado en la Fig. 8 y una ampliación en el rango de 1544 y 1550 nm, para estimar la planitud (*"flatness"*) del peine óptico, se observa en la Fig. 9.

El peine óptico obtenido tiene un rango (span) de 11.5 nm (1.44 THz) @ -10 dB y 15.48 nm (1.9 THz) @ -20 dB; con separación intermodal de 10.17 GHz. No es totalmente plano puesto que tiene una variación en la intensidad de los modos; hemos estimado una planitud de 73 líneas @ -5 dB, en las mejores condiciones de medición.

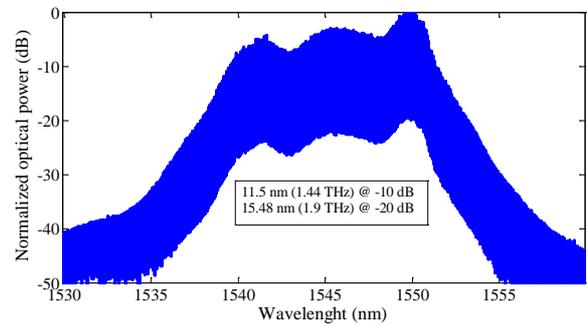


Fig. 8. Espectro óptico con moduladores y láser semilla. El ancho de banda es 1.44 THz @ -10dB y 1.9 THz @ -20dB.

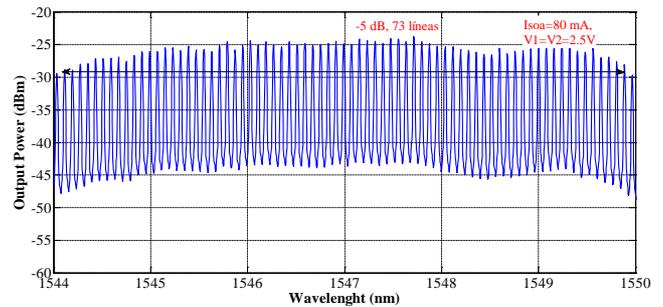


Fig. 9. Planitud del peine óptico obtenido con 73 líneas @ -5dB y 10.1 GHz de separación. Isoa=80 mA, $V_1=V_2=-2.5$ V

B. Resultados Experimentales del OFCG Basado en un Láser Anillo Mode Locked Pasivo.

El setup que usamos para caracterizar el dispositivo es similar al del precedente OFCG con moduladores. Se aplica la corriente a los dos SOAs cortocircuitados, en pasos de 2 mA desde 0 a 65 mA. Los moduladores de fase EOM₁ and EOM₂ del brazo superior del MZI son polarizados con voltajes de $V_1=V_2 = -1.3$ V; los moduladores EOM₃ y EOM₄ son conectados a tierra. Esto establece una polarización asimétrica de los moduladores de fase, lo cual genera el desplazamiento de fase necesario para conseguir la planitud del espectro. El SA se polariza al nivel $V_{sa} = -2.0$ V con el que se consigue el régimen mode-locking. El espectro óptico generado @ -10 dB va desde 1558 nm a 1566.7 nm cuando la corriente del SOA es de 51.7 hasta 65 mA. El mejor resultado se consigue mediante la polarización de los dos SOA con 62 mA, el SA con -2V y los moduladores de fase con voltaje $V_1 = V_2 = -1.3$ V. La potencia óptica promedio lograda es 2 mW. El espectro óptico se muestra en las Fig. 10 y Fig. 11.

El ancho de banda @ -10 dB es 8.7 nm (1.08 THz) con 107 líneas espectrales espaciadas por 10.16 GHz. Los EOPM se utilizan para un ajuste fino de la planitud del peine y así equalizar la forma del espectro de salida [21]. Obtuvimos una planitud de 44 líneas dentro de una variación de potencia de 1.8 dB; lo cual es un valor notable en el contexto del estado del arte actual, en el que se han logrado valores de planitud de 38 líneas en 1.5 dB [16] con OFCG operando con moduladores en cascada.

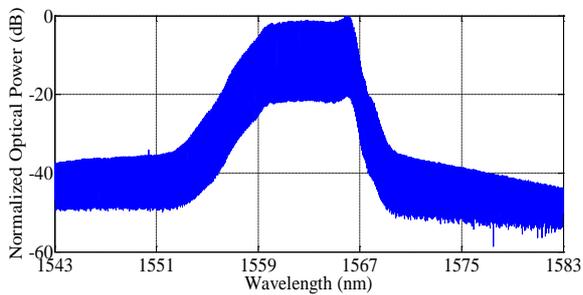


Fig. 10. Espectro óptico con láser mode locked pasivo. El ancho de banda es 1.08 THz @ -10dB.

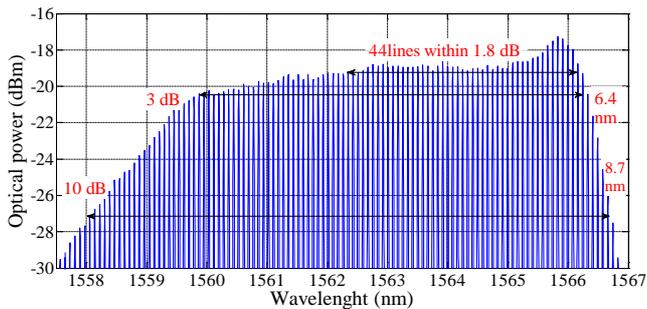


Fig. 11. Planitud del peine óptico con 107 líneas @ -10dB y 10.16 GHz de separación. Isoa1=Isoa2= 62 mA; V1= V2= -1.3V; Vsa= -2.0 V.

IV. CONCLUSIONES

Diseñamos un generador de frecuencias ópticas basado en moduladores de fase electro-ópticos, totalmente integrado, que incluye internamente un láser semilla monomodo. Fabricamos el PIC en una plataforma estándar, el mismo que contiene tres anillos, y tiene la capacidad de generar peines a tasas de repetición de 6.73 GHz, 7.5 y 10 GHz. El espectro óptico obtenido es de 11.5 nm (@ -10 dB). Este parámetro es equiparable a resultados del estado del arte actual obtenidos con dispositivos OFCG con anillo de fibra óptica. Observamos un incremento de líneas espectrales y eualización del espectro cuando varía la polarización de los EOPM. Por tanto, se concluye que los moduladores electro-ópticos influyen en la planitud del peine y en el ancho de banda. También demostramos la generación de peines de frecuencias ópticas usando un láser anillo integrado con interferómetro Mach Zehnder, operando en régimen mode locked pasivo, fabricado en una plataforma de integración genérica, en una ronda MPW, compartiendo costos con otros usuarios. Conseguimos un peine óptico con líneas espaciadas 10.16 GHz y un ancho de banda de 8.7 nm @ -10 dB. No es necesario el uso de una señal RF externa ni un láser semilla, lo cual es ventajoso respecto a OFCG con moduladores en cascada. Concluimos que el uso de bloques estandarizados en el presente diseño y fabricación permitirá el desarrollo de un set de dispositivos que pueden ser utilizados en otras rondas de manufactura; implementando circuitos más complejos, como transmisores multi-longitud de onda para aplicaciones DWDM.

REFERENCIAS

[1] S. Bennett, B. Cai, E. Burr, O. Gough, and A. J. Seeds, "1.8-THz bandwidth, zero-frequency error, tunable optical comb generator for DWDM applications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, No. 5, pp. 551–553, May 1999.

[2] Silva, C.F.C. y Seeds, A.J., "A dense WDM source for high spectral efficiency system using comb generation and SG-DBR injection-

locked laser filtering", in *European Conference on Optical Communication*, 2001.

[3] International Telecommunications Union, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.692-199810-I/es>.

[4] T. Sakamoto, T. Kawanishi and M. Izutsu, "Widely wavelength-tunable ultra-flat frequency comb generation using conventional dual-drive Mach-Zehnder modulator", *Electronic Letters*, vol 43, pp. 1039-1040, 2007.

[5] J. Zhang, J. Yu, N. Chi, Z. Dong, X. Li, Y. Shao, J. Yu and L. Tao, "Flattened comb generation using only phase modulators driven by fundamental frequency sinusoidal sources with small frequency offset," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 4, pp. 552–4, Feb. 2013.

[6] K. Ho and J. Kahn, "Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 721–725, 1993.

[7] E. A. Avrutin, J. H. Marsh and E. L. Portnoi, "Monolithic and multi-gigahertz mode-locked semiconductor lasers: constructions, experiments, models and applications," in *IEE Proceedings Optoelectronics*, vol. 147, no. 4, pp. 251-278, Aug. 2000.

[8] M. Smit, X. Leijtens, E. Bente, J. Van der Tol, H. Ambrosius, D. Robbins, M. Wale, N. Grote, and M. Schell, "Generic foundry model for InP-based photonics," *IET Optoelectron.*, vol. 5, no. 5, p. 187, 2011.

[9] N. Dupuis, C. R. Doerr, L. Zhang, L. Chen, N. J. Sauer, P. Dong, L. L. Buhl, y D. Ahn, "InP-based comb generator for optical OFDM", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 466–472, 2012.

[10] T. Saikai, T. Yamamoto, H. Yasaka and E. Yamada, "Flat-top Optical Frequency Comb Block Generation using InP-based Mach-Zehnder Modulator", in *Proc. of the 25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, IPRM2013, Kobe, Japan, May. 2013, paper MoD3-3.

[11] Z. Wang, K. Van Gasse, V. Moskalenko, S. Latkowski, E. Bente, B. Kuyken y G. Roelkens, "A III-V-on-Si ultra-dense comb laser", *Journal Light: Science & Applications*, Vol 6, e16260, 2017.

[12] S. Arafin and L. A. Coldren, "Advanced InP Photonic Integrated Circuits for Communication and Sensing," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 1, pp. 1-12, Jan.-Feb. 2018.

[13] J. S. Parker, A. Bhardwaj, P. R. A. Binetti, Y.-J. Hung, and L. A. Coldren, "Monolithically Integrated Gain-Flattened Ring Mode-Locked Laser for Comb-Line Generation," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 2, pp. 131–133, Jan. 2012.

[14] OCLARO. <http://www.oclaro.com/technology/photonic-integration/>

[15] J. Zhao, "Integrated Multi-Wavelength Transmitter using Filtered-Feedback", Thesis dissertation, The Netherlands, 2013.

[16] Y. Dou, H. Zhang and M. Yao, "Generation of Flat Optical-Frequency Comb Using Cascaded Intensity and Phase Modulators," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 9, pp. 727-729, May 2012.

[17] E. Bente, V. Moskalenko, S. Latkowski, S. Tahvili, L. Augustin and M. Smit, "Monolithically integrated InP-based modelocked ring laser systems", *Proc. of SPIE*, vol. 9134, pp. 91340C-1–91340C-10, 2014.

[18] K. A. Williams, M G Thompson and I H White "Long-wavelength monolithic mode-locked diode lasers" *New Journal of Physics* Vol. 6, 179, 2004.

[19] V. Moskalenko, J. Javaloyes, S. Balle, M. K. Smit and E. A. J. M. Bente, "Theoretical Study of Colliding Pulse Passively Mode-Locked Semiconductor Ring Lasers With an Intracavity Mach-Zehnder Modulator," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 50, no. 6, pp. 415-422, Jun. 2014.

[20] SMART PHOTONICS. <http://www.smartphotonics.nl/>

[21] L. Chen, C. R. Doerr, N. Dupuis, "Tunable optical frequency comb generator", United States Patent application publication, Sep. 13, 2012.